

Исследования реакционноспособных пленочных гетероструктур с несколькими интерфейсами с помощью метода термодесорбционной спектроскопии

© Д.В. Бутурович, М.В. Кузьмин, М.В. Логинов, М.А. Митцев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: M.Mittsev@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 31 октября 2012 г.)

С помощью метода термодесорбционной спектроскопии исследовано взаимодействие хемосорбированных молекул кислорода и монооксида углерода с пленками иттербия нанометровой толщины, сформированными на поверхности кремниевых подложек при комнатной температуре. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при 300 К молекулы O_2 и CO находятся на поверхности пленок металла в хемосорбированном состоянии и что при этих условиях они не диссоциируют на атомы. Разложение молекул происходит при повышенных температурах. Выделившийся при этом кислород вступает в реакции с иттербием и кремнием, в результате чего образуются сложные силикатные соединения, которые разлагаются при еще более высоких температурах.

В ряде предыдущих наших работ [1–5], выполненных с помощью методов измерения работы выхода и электронной Оже-спектроскопии (ЭОС), было показано, что после выдержки нанопленок иттербия, выращенных на поверхности кремния $Si(111)$, в атмосфере монооксида углерода или кислорода при заданном давлении и комнатной температуре, электронная структура пленок меняется кардинальным образом. Последующие исследования дали возможность сделать вывод, что указанные изменения обусловлены молекулами газов, находящимися на поверхности пленок в хемосорбированном состоянии, т.е. что диссоциации молекул не происходит, а следовательно, и нет диффузии в объем атомов кислорода или углерода. Последний вывод является очень существенным хотя бы потому, что в целом ряде работ [6–12], выполненных ранее, предполагалось, что тонкие пленки металлов, в том числе пленки иттербия, при их помещении в атмосферу кислорода трансформируются в оксиды.

Учитывая важность и приоритетность вывода, сделанного в этих работах о том, что молекулы при хемосорбции не диссоциируют на поверхности нанопленок иттербия, а также учитывая, что доказательства этого чрезвычайно трудны и не всегда дают абсолютно однозначный ответ, было решено провести исследования с помощью дополнительных поверхностно-диагностических методов. Одним из таких методов является метод термодесорбционной спектроскопии (ТДС) [13]. С помощью ТДС в принципе можно получать информацию о том, происходит ли испарение иттербия из силицидов, из оксидов или из металлической фазы. Такие возможности метода ТДС были проиллюстрированы, например, в нашей работе [14], в которой исследовались структуры $Yb-W$ и O_2-Yb-W . В частности, в ней было показано, что испарение иттербия из металлической и оксидной фаз происходит при существенно различных температурах и поэтому термодесорбционные (ТД) спектры дают

возможность диагностировать тонкопленочные структуры на наличие той или иной фазы. Этот вывод и послужил основой для постановки настоящей работы.

Значительный вклад в развитие метода ТДС и его применение в различных областях исследований был сделан в 1960–1980-х годах выдающимся отечественным ученым Николаем Ильичом Ионовым, столетие со дня рождения которого отмечается в 2013 г. Настоящая работа может рассматриваться как логическое продолжение исследований, начатых Н.И. Ионовым во второй половине XX века. Приведенные в этой работе результаты наглядно показывают, как метод ТДС, известный как один из классических методов диагностики поверхности, может успешно применяться и в современных исследованиях пленочных структур, интерфейсов и наноматериалов. Все это и послужило основанием для включения настоящей работы в мемориальный выпуск, посвященный Ионову Н.И.

Методика эксперимента

В настоящей работе исследовались три вида структур: 1 — $Yb-Si(111)$, 2 — „хемосорбированная пленка газа (CO или O_2)– $Yb-Si(111)$ “ и 3 — так называемые „слоистые структуры“. Первые из них создавались путем напыления *in situ* необходимого количества иттербия на поверхность кремния, имеющего комнатную температуру. Как было показано в нашей работе [15], при таких условиях перемешивание атомов Yb и Si практически отсутствует, а механизм роста пленок иттербия имеет послыйный характер. Все это обеспечивает высокую однородность пленок по толщине и химическому составу.

Структуры вида „хемосорбированная пленка газа– $Yb-Si(111)$ “ формировались путем адсорбции монооксида углерода или кислорода на поверхность иттербиевых пленок нанометровой толщины, выращенных на

кремниевых подложках при комнатной температуре, т. е. путем адсорбции газов на структурах Yb–Si(111).

„Слоистые структуры“ создавались путем поочередного осаждения на кремниевую подложку монослоя иттербия и насыщающего покрытия кислорода и т. д. [14].

Термодесорбционные спектры регистрировались с помощью магнитного секторного масс-спектрометра, встроенного в вакуумную камеру УСУ-4 с базовым давлением $4 \cdot 10^{-11}$ Торр. В этой же камере были реализованы ЭОС, дифракция медленных электронов (ДМЭ) и метод измерения контактной разности потенциалов, который, как известно, дает возможность измерять разность работ выхода $\Delta\varphi = (\varphi_0 - \varphi)$ чистой поверхности какой-либо подложки (φ_0) и работы выхода этой же подложки, покрытой адсорбированными слоями (φ).

В качестве подложек в экспериментах использовались кремниевые образцы *n*-типа (удельное сопротивление $1 \Omega \cdot \text{cm}$). Перед началом экспериментов они прогревались в вакууме сначала при 900 К в течение нескольких часов, а затем производилась их окончательная очистка кратковременными прогревами при 1500–1550 К. Контроль чистоты образцов производился с помощью ЭОС. Для контроля структурного совершенства их поверхности использовался метод ДМЭ. Этот метод показал, что всегда после указанной температурной обработки на поверхности кремния Si(111) формируется сверхструктура 7×7 .

Скорость осаждения иттербия обычно составляла 1 монослой (ML) в минуту. Калибровка потока атомов иттербия производилась с помощью метода ТДС по появлению характерных особенностей в спектрах структур Yb–Si(111) [16]. За 1 ML атомов Yb на Si(111) была принята величина поверхностной концентрации атомов $7.84 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, равная концентрации атомов Si на нереконструированной поверхности Si(111) (1×1).

Адсорбция газов на поверхность пленок Yb производилась при давлении в вакуумной камере, равном $2 \cdot 10^{-7}$ Торр. Напуск газов в вакуумную камеру осуществлялся с помощью системы напуска, которая имела дифференциальную откачку и которая перед экспериментами подвергалась тщательной очистке. Чистота напускаемых газов контролировалась масс-спектрометром, находившимся в непосредственной близости от исследуемых образцов.

Как уже указывалось, регистрация ТДС-спектров, т. е. зависимостей потоков каких-либо атомов или молекул, которые испаряются с поверхности, от температуры, меняющейся во времени по какому-либо закону, производилась с помощью магнитного масс-спектрометра. В этом масс-спектрометре атомы или молекулы ионизовались электронным ударом. Как известно [17], вероятность такой ионизации зависит от скорости ионизируемых частиц. Поэтому при термическом испарении таких частиц с поверхности какой-либо структуры их поток ν будет связан с током ионов I^+ на выходе масс-спектрометра соотношением

$$\nu = kI^+T^{1/2},$$

где k — коэффициент пропорциональности и T — температура. Из этого соотношения следует, что для того,

чтобы получать неискаженные ТДС-спектры необходимо учитывать температуру. Такой учет в настоящей работе производился.

Нагрев изучаемых структур в процессе регистрации ТДС-спектров производился путем пропускания через кремниевые подложки линейно нарастающего во времени электрического постоянного тока. При таком нагреве температура зависела от времени нелинейно. Однако в области высоких температур (выше 1000 К), в которой, в основном, расположены ТДС-спектры, эти отклонения от линейности не очень велики.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены ТДС-спектры структур Yb–Si(111) и CO–Yb–Si(111) для различных толщин пленок иттербия $d(\text{Yb})$, выраженных в монослоях, и дозе CO, равной 480 L ($1 \text{ L} = 10^{-6}$ Торр s). На рис. 2 показаны ТДС-спектры структур CO–Yb–Si(111) для двух толщин пленок иттербия 8 и 16 ML и дозы 120 L.

ТДС-спектры структур Yb–Si(111) для больших значений толщин пленок иттербия (спектр 3, рис. 1, $d(\text{Yb}) = 16 \text{ ML}$) имеют два сильно разнесенных по шкале температур максимума α и β_1 . Природа этих десорбционных максимумов может быть интерпретирована, в частности, на основе анализа данных ЭОС, полученных в работе [5]. На рис. 3 представлены полученные в настоящей работе зависимости величин оже-сигналов иттербия и кремния для структуры Yb–Si(111), сформированной при 300 К (толщина пленки 16 ML), от температуры, при которой эта структура прогревалась. Прогрев проводился ступенчато при 350, 400, 500 К и т. д. Время прогрева при каждой температуре составляло

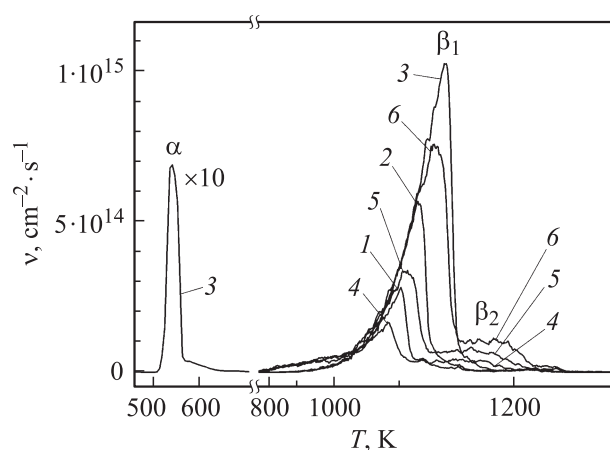


Рис. 1. Термодесорбционные спектры структур Yb–Si(111) (спектры 1–3) и структур CO–Yb–Si(111) (спектры 4–6). Толщины пленок Yb: спектры 1, 4 — 4; 2, 5 — 8 и 3, 6 — 16 ML. Доза CO — 480 L. По горизонтальной оси указаны температуры структур в процессе регистрации спектров, по вертикальной оси — значения потоков ν атомов Yb с поверхности. Средняя скорость нагрева образцов в интервале 1000–1300 К составляла 3.8 K/s.

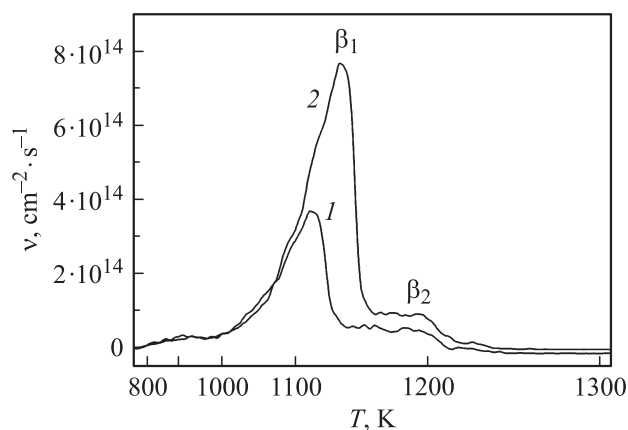


Рис. 2. Термодесорбционные спектры структур CO–Yb–Si(111). Толщины пленок Yb: спектр 1 — 8, 2 — 16 ML. Доза CO — 120 L. По горизонтальной оси указаны температуры структур в процессе регистрации спектров, по вертикальной оси — значения потоков ν атомов Yb с поверхности. Средняя скорость нагрева образцов в интервале 1100–1300 K составляла 3.8 K/s.

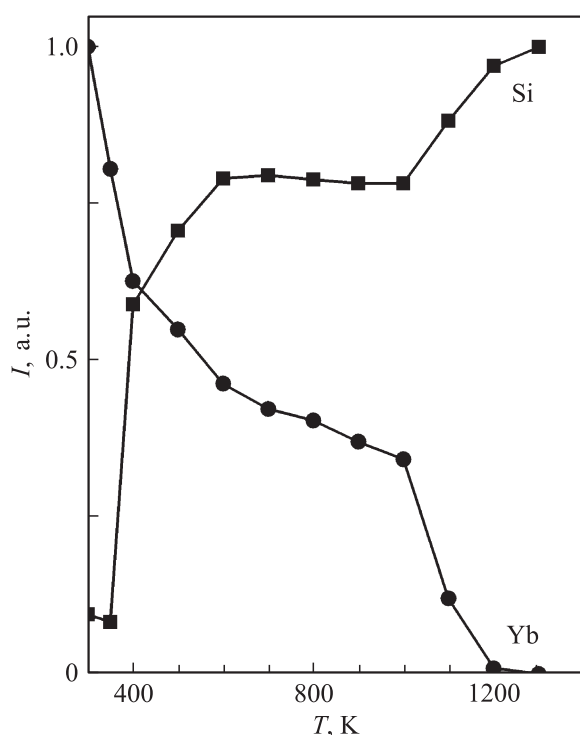


Рис. 3. Зависимости интенсивности I оже-сигналов кремния и иттербия от температуры прогрева подложки для структур Yb–Si(111). Детали эксперимента приведены в работе [5].

45 s. Амплитуды оже-сигналов react-to-peak регистрировались при комнатной температуре. Из приведенных на рис. 3 данных следует, что при 400–600 K происходит частичное перемешивание атомов Yb и Si, а в области более высоких температур (> 600 K) наблюдается образование устойчивого силицидного соединения, стехиометрия которого, как следует из постоянства оже-сиг-

нала кремния, не меняется до температуры прогрева 1000 K. Таким соединением, по данным работы [18], является дисилицид Yb.

На основании рассмотренных выше результатов можно утверждать следующее. Низкотемпературный десорбционный максимум α , который по амплитуде примерно в 14 раз меньше высокотемпературного максимума β_1 (рис. 1), обусловлен испарением атомов Yb из пленки металла, которое происходит в процессе регистрации термодесорбционного спектра. Об этом также свидетельствует и сопоставление области температур, в которой расположен этот максимум, с данными по давлению паров металлического иттербия [19,20]. Указанная трактовка природы низкотемпературного максимума дает основание предполагать, что интенсивный высокотемпературный максимум β_1 при $T = 1145$ K обусловлен испарением атомов Yb из дисилицида иттербия, который формируется на поверхности в процессе регистрации ТД-спектров в результате реакции между иттербием и кремниевой подложкой. Такой вывод подтверждается результатами нашей уже упоминавшейся работы [5].

Малая интенсивность низкотемпературного максимума свидетельствует о том, что силицид формируется уже при тех температурах, при которых атомы Yb испаряются в вакуум, т.е. на поверхности происходят одновременно два конкурирующих процесса. Первый из них — испарение атомов Yb в вакуум — происходит на границе раздела пленка иттербия–вакуум, а второй — на границе раздела пленка иттербия–кремний. Очевидно, что с уменьшением толщины пленок иттербия вклад первого процесса будет уменьшаться, а второго — возрастать. Такой вывод подтверждается ТД-спектрами структур Yb–Si(111) для $d(\text{Yb}) = 4$ и 8 ML (спектры 1 и 2 на рис. 1). При этих толщинах пленок в спектрах также наблюдаются низкотемпературные максимумы (на рис. 1 они не показаны), но их интенсивность значительно меньше, чем на спектрах для структур с $d(\text{Yb}) = 16$ ML. Так, если для пленок иттербия толщиной 16 ML отношение площадей низкотемпературного и высокотемпературного максимумов равно $2.3 \cdot 10^{-2}$, то для $d(\text{Yb}) = 4$ и 8 ML это отношение имеет величины соответственно $6 \cdot 10^{-4}$ и $4 \cdot 10^{-3}$. Приведенные значения указывают на то, что испарение атомов Yb из металлической пленки ослабевает значительно быстрее, чем уменьшается толщина пленок. Это подтверждают сделанные ранее предположения о природе процессов на поверхности, определяющих величину низкотемпературного максимума.

ТД-спектры структур CO–Yb–Si(111) для двух значений доз CO (рис. 1, спектры 4–6, и рис. 2, спектры 1 и 2) качественно отличны от аналогичных спектров структур Yb–Si(111). Это отличие выражается прежде всего в том, что в этих спектрах отсутствует низкотемпературный пик α . Кроме того, в них наблюдается небольшой максимум β_2 , смещенный относительно максимума β_1 в область более высоких температур.

Отсутствие в спектрах низкотемпературных максимумов напрямую связано с адсорбцией на поверхности пленок иттербия молекул CO. Как было показано в наших

предыдущих работах [1,2,4,5], хемосорбированные на поверхности пленок иттербия молекулы СО переводят его из двухвалентного состояния в трехвалентное, в результате чего возрастает связь между атомами Yb, образующими металл. Поэтому его испарение должно происходить при более высоких температурах. В условиях проводившихся экспериментов, как следует из рис. 1 и 2, это наблюдается при тех же самых температурах, при которых происходит испарение иттербия из силицида, формирующегося в структурах Yb–Si(111) (рис. 1). Такое совпадение может означать, что, прежде чем иттербий начнет испаряться из трехвалентного состояния, происходит либо десорбция молекул СО с поверхности пленок, либо их частичная диссоциация. Оба этих процесса должны сопровождаться переходом иттербия в двухвалентное состояние. Этот переход делает возможным формирование силицида иттербия, который затем при более высоких температурах разлагается. Высвобождающиеся при этом атомы Yb испаряются в вакуум. Описанная схема процессов на поверхности согласуется с результатами нашей предыдущей работы [5].

Характерной особенностью максимума β_2 в ТД-спектрах структур СО–Yb–Si(111) является его малая интенсивность. Было высказано предположение, что он обусловлен десорбцией атомов Yb из состояний, которые формируются на поверхности с участием атомов кислорода. Атомы же кислорода появляются на поверхности в результате диссоциации молекул СО при повышенных температурах. Для проверки сделанных предположений были исследованы ТД-спектры слоистых структур. На рис. 4 приведен один такой спектр для структур, содержащих 6 слоев иттербия и 6 слоев кислорода (доза кислорода для каждого слоя 360 L). Видно, что спектр содержит только один десорбционный пик, который расположен при тех же температурах, что и высокотемпературный пик β_2 в спектрах структур СО–Yb–Si(111). Это является свидетельством того,

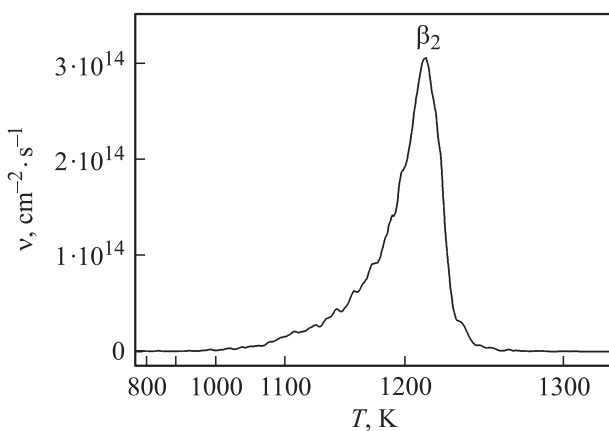


Рис. 4. Термодесорбционные спектры слоистых структур (см. текст). На горизонтальной оси приведены значения температур структур в процессе регистрации спектров, по вертикальной оси — значения потоков ν атомов Yb с поверхности. Средняя скорость нагрева образцов в интервале 1100–1300 К составляла 3.8 К/с.

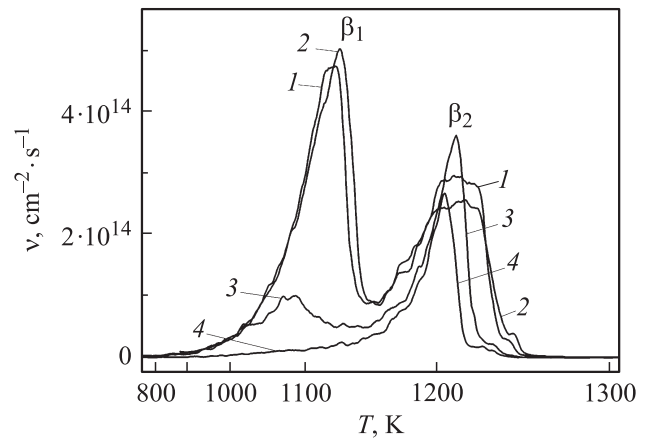


Рис. 5. Термодесорбционные спектры структур O₂–Yb–Si(111). Толщины пленок Yb: спектр 1 — 4; 2 — 8; 3, 4 — 16 ML. Доза кислорода: спектры 1–3 — 360, спектр 4 — 60 L. По горизонтальной оси указаны температуры структур в процессе регистрации спектров, по вертикальной оси — значения потоков ν атомов Yb с поверхности. Средняя скорость нагрева образцов в интервале 1100–1300 К составляла 3.8 К/с.

что последний обусловлен испарением атомов Yb из состояний, в которых они взаимодействуют с кислородом. Малая его интенсивность свидетельствует о том, что разложение молекул монооксида углерода как при комнатной температуре, так и при повышенных ее значениях незначительно. Этот вывод согласуется с результатами наших предыдущих работ [1,2,4,5]. Согласно этим результатам, молекулы СО на поверхности пленок иттербия при комнатной температуре не диссоциируют на атомы.

Возможная природа состояний, которые формируются на поверхности с участием атомов кислорода и из которых происходит десорбция атомов Yb, в результате чего формируется максимум β_2 в ТД-спектрах структур СО–Yb–Si(111), будет рассмотрена далее при анализе результатов для структур O₂–Yb–Si(111). Часть из этих результатов приведена на рис. 5, на котором представлены ТД-спектры для трех значений толщин пленок иттербия 4, 8 и 16 ML и двух значений доз кислорода 60 и 360 L. Видно, что ТД-спектры структур O₂–Yb–Si(111) также имеют два максимума β_1 и β_2 , расположенные при тех же температурах, что и аналогичные максимумы в структурах СО–Yb–Si(111). Это свидетельствует о том, что природа максимумов в обеих структурах одна и та же. Однако имеются количественные различия. Они выражаются прежде всего в том, что интенсивность максимума β_1 в спектрах структур O₂–Yb–Si(111) очень резко зависит от толщины пленок иттербия. Так, при $d(\text{Yb}) = 16 \text{ ML}$ этот максимум является преобладающим в спектрах, а при толщине пленок 4 ML он практически отсутствует, и ТД-спектр образован в основном максимумом β_2 , который имеет при этом значительную интенсивность и который, как это было указано выше, обусловлен испарением атомов Yb из состояний, формирующихся на поверхности с участием атомов кислорода.

В связи с только что сказанным возникает вопрос: происходит ли испарение иттербия из состояний, в которых он взаимодействует с кислородом, только в виде атомов или же испаряются также какие-то молекулы, содержащие атомы Yb, Si и O. Для решения этого вопроса в настоящей работе были поставлены специальные опыты. Эти опыты дали следующие результаты. При тех скоростях нагрева, которые использовались при регистрации ТД-спектров рис. 4, никаких молекулярных ионов в масс-спектрах зарегистрировано не было. Однако когда скорость нагрева была увеличена примерно в 5 раз, то в масс-спектрах появились слабые линии, соответствующие ионам YbO^+ и YbSiO^+ . Зависимость интенсивности этих линий от температуры в процессе регистрации ТД-спектров показана на рис. 6. Эти результаты свидетельствуют о том, что на поверхности (скорее всего, при нагреве), иттербий по меньшей мере частично вступает в реакцию с кислородом и кремнием. Образовавшиеся при этом молекулы частично испаряются. Другая же их часть разлагается при более высоких температурах. Освободившийся при этом иттербий испаряется в виде атомов. Соотношение между количеством испарившихся и разложившихся молекул зависит от скорости нагрева, используемой при регистрации ТД-спектров. При ее увеличении больше молекул не успеют разложиться, и поэтому интенсивность линий молекулярных ионов в масс-спектрах должна возрастать. Эксперименты подтверждают этот вывод.

Очевидно, что из-за процесса разложения молекул, скорость которого возрастает при повышении температуры, ТД-спектры молекул, подобные приведенным на рис. 6, будут смещены относительно аналогичных спектров Yb в сторону более низких температур. Этот вывод подтверждается рис. 6.

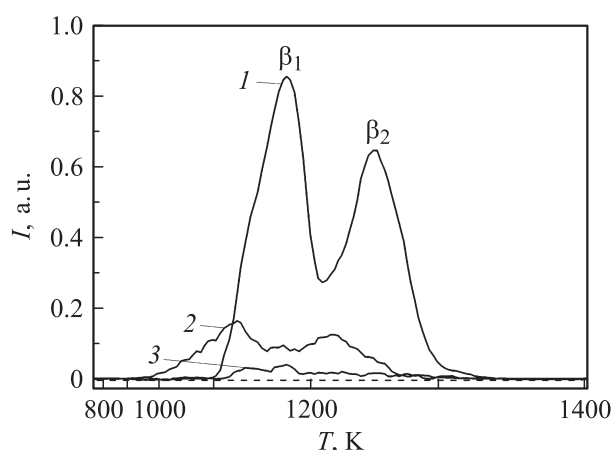


Рис. 6. Термодесорбционные спектры структур $\text{O}_2\text{-Yb-Si}(111)$. Толщина пленок иттербия 16 ML, доза кислорода 360 L. По горизонтали указаны температуры структур в процессе регистрации спектров, по вертикали — значения токов ионов Yb^+ на выходе масс-спектрометра (спектр 1), ионов YbO^+ (спектр 2) и ионов YbSiO^+ (спектр 3). Средняя скорость нагрева структур в интервале температур 1100–1300 K составляла 18.6 K/s.

Результаты, приведенные на рис. 4–6, дают возможность высказать некоторые соображения, касающиеся процессов, протекающих в структурах $\text{O}_2\text{-Yb-Si}(111)$ при их нагреве в процессе регистрации ТД-спектров. Во-первых, наличие в масс-спектрах линий молекулярных ионов YbO^+ и YbSiO^+ указывает на то, что при повышенных температурах на поверхности могут образовываться как чисто оксидные, так и силикатные с участием в них кислорода фазы. А во-вторых, слабая зависимость интенсивности максимумов β_1 и β_2 в ТД-спектрах рис. 4 от дозы кислорода (для пленок кислорода 16 ML она изменялась в 6 раз от 60 до 360 L) может указывать на то, что заметной диффузии кислорода в объем пленок иттербия при комнатной температуре не происходит и что, следовательно, весь кислород в структурах $\text{O}_2\text{-Yb-Si}(111)$ сосредоточен на поверхности в хемосорбированном слое. Но тогда возникает вопрос, почему в ТД-спектрах этих структур максимум β_2 имеет такую большую величину. Действительно, согласно проведенным оценкам, в случае пленок иттербия с $d(\text{Yb}) = 16 \text{ ML}$ из высокотемпературной фазы (максимум β_2) испаряется 43% (или $5.4 \cdot 10^{16}$ атомов Yb с 1 cm^2) всех атомов Yb в случае дозы 60 L и 47% (или $5.9 \cdot 10^{16}$ атомов Yb) при дозе 360 L. С другой стороны, если при комнатной температуре весь кислород сосредоточен, в основном, в адсорбированном слое, то его количество не должно существенно превышать величину $1 \cdot 10^{15} \text{ molecules/cm}^2$. Из этих оценок сразу вытекает вывод, что имеющегося на поверхности кислорода недостаточно для того, чтобы образовалось $5.4 \cdot 10^{16}$ молекул YbO при дозе 60 L или $5.9 \cdot 10^{16}$ таких же молекул при дозе 360 L. Тем более этого кислорода будет недостаточно для формирования основного полуторного оксида Yb_2O_3 . Из этого следует, что высокотемпературный максимум в ТД-спектрах структур $\text{O}_2\text{-Yb-Si}(111)$ не может быть обусловлен испарением атомов Yb из чисто оксидных фаз. Отметим также, что этот вывод хорошо согласуется с результатами ряда других работ (см., например, [21]). В них показано, что испарение полуторного оксида иттербия происходит при температурах, превышающих 2000 K. Очевидно, что они значительно (на 700 K и более) превышают температуры, при которых наблюдаются термодесорбционные пики в настоящей работе.

Вероятнее всего, на поверхности при нагреве формируются силикатные фазы [18], в которых каким-то образом участвует кислород. В результате испарения атомов Yb из этих сложных фаз и формируется в ТД-спектрах максимум β_2 , смещенный относительно силицидного пика β_1 в область более высоких температур. Возможность формирования на поверхности силикатных фаз при повышенных температурах подтверждается регистрацией в масс-спектрах ионов YbSiO^+ .

Естественно предположить, основываясь на качественном сходстве ТД-спектров структур $\text{O}_2\text{-Yb-Si}(111)$ и $\text{CO-Yb-Si}(111)$, что и в случае последних при повышенных температурах из иттербия, кремния и кислорода, образующегося при частичном разложении молекул CO,

формируются сложные силикатные соединения, испарение атомов Yb из которых происходит при более высоких температурах, чем из силицида. Однако, исходя из того, что связь в CO более сильная, чем в молекулах O₂, можно предположить также, что разложение молекул монооксида углерода при повышенных температурах происходит менее интенсивно. И это в конечном счете приводит к тому, что высокотемпературный максимум β_2 в ТД-спектрах структур CO–Yb–Si(111) имеет существенно меньшую интенсивность, чем аналогичный максимум в спектрах структур O₂–Yb–Si(111).

Выводы

Исследования, проведенные с помощью метода термодесорбционной спектроскопии, подтвердили и дополнили выводы, сделанные ранее в ряде наших предыдущих работ [1–5], что молекулы O₂ и CO при адсорбции на пленках иттербия нанометровой толщины не диссоциируют на атомы при комнатной температуре и что они модифицируют свойства указанных пленок, находясь на их поверхности в хемосорбированном состоянии. Диссоциация молекул (полная или частичная) происходит при повышенных температурах. Высвободившийся при этом кислород вступает в реакции с иттербием и кремнием, в результате чего образуются сложные силикатные соединения, которые разлагаются при еще более высоких температурах.

Работа выполнена по программе фундаментальных исследований президиума РАН № 22 „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“ (раздел 2: наноматериалы).

Список литературы

- [1] Бутурович Д.В., Кузьмин М.В., Логинов М.В., Митцев М.А. // ФТТ. 2009. Т. 51. С. 795.
- [2] Кузьмин М.В., Митцев М.А. // ФТТ. 2010. Т. 52. С. 577.
- [3] Кузьмин М.В., Митцев М.А. // ФТТ. 2010. Т. 52. С. 1202.
- [4] Кузьмин М.В., Митцев М.А. // ФТТ. 2011. Т. 53. С. 569.
- [5] Кузьмин М.В., Митцев М.А. // ФТТ. 2011. Т. 53. С. 1224.
- [6] Padalia B.D., Gimzewski J.K., Affrosman S., Lang W.C., Watson L.M., Fabian D.J. // Surf. Sci. 1976. Vol. 61. P. 468.
- [7] Jochansson L.I., Allen J.W., Lindau I., Hecht M.H., Hagström S.B.M. // Phys. Rev. B. 1980. Vol. 21. P. 1408.
- [8] Strasser G., Bertel E., Netzer F.P. // J. Catalysis. 1983. Vol. 79. P. 420. (1983).
- [9] Netzer F.P., Strasser G., Matthew J.A.D. // Sol. St. Comm. 1983. Vol. 45. P. 171.
- [10] Takakuwa Y., Suzuki S., Yokotsuka T., Sagawa T. // J. Phys. Soc. Jpn. 1984. Vol. 53. P. 687.
- [11] Schmidt-May J., Gerken F., Nyholm R., Davis L.C. // Phys. Rev. B. 1984. Vol. 30. P. 5560.
- [12] Meier R., Weschke E., Bievetski A., Schübler-Langeheine C., Hu Z., Kaindl G. // Chem. Phys. Lett. 1998. Vol. 292. P. 507.
- [13] Вудраф Д., Делчар Т. Современные методы исследования поверхности / Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 568 с.
- [14] Кузьмин М.В., Митцев М.А. // ФТТ. 2012. Vol. 54. P. 378.
- [15] Бутурович Д.В., Кузьмин М.В., Логинов М.В., Митцев М.А. // ФТТ. 2008. Т. 50. С. 168.
- [16] Крачино Т.В., Кузьмин М.В., Логинов М.В., Митцев М.А. // ФТТ. 1997. Т. 39. P. 256.
- [17] Hudson J.B., Sandejas J.S. // J. Vac. Sci. Technol. 1967. Vol. 4. P. 230.
- [18] Netzer F.P. // J. Phys.: Condens. Matter. 1995. Vol. 7. P. 991.
- [19] The Characterization of High Temperature Vapours / Ed. by J. Margrave. N.Y.: John Wiley & Sons. 1967. 555 p.
- [20] Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства / Под ред. Г.В. Самсонова. М.: Металлургия, 1976. 599 с.
- [21] Казенас Е.Л., Цветков Ю.В. Испарение оксидов. М.: Наука, 1997. 501 с.